

ПИСЬМА  
В РЕДАКЦИЮ

DOI: 10.7868/S0869587314110061

**ИСКУССТВЕННАЯ ЗАМКНУТАЯ ЭКОСИСТЕМА  
КАК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИИ**

Интерес научного сообщества к проблемам биосферы непрерывно растёт, особенно в последние годы, под влиянием ощущения надвигающегося глобального экологического кризиса. Мы знаем довольно много о том, как устроена глобальная экосистема, но о том, как работает эта гигантская биологическая машина и как ей удаётся гармонично существовать на протяжении миллиардов лет, обходя мощнейшие преграды и катаклизмы, известно очень мало. Тем не менее человек захотел освоить другие планеты, где биосферы нет. Людей беспокоит современное состояние земной биосферы, которое нарушается хозяйственной деятельностью человека. На случай глобальной катастрофы стали строить искусственные аналоги биосферы – автономные системы жизнеобеспечения (АСЖО), которые могли бы пригодиться и для продолжительных космических полётов, и будущих космических поселений на других планетах. Попытки создания таких систем предпринимаются в США (“Биосфера-2”), Европе (MELISSA), Японии (“Экотроны”), Канаде, Китае и России (БИОС).

Статья А.Г. Дегерменджи и А.А. Тихомирова “Создание искусственных замкнутых экосистем земного и космического назначения” (Вестник РАН. 2014. № 3) посвящена важнейшей проблеме современности – изучению биосферных процессов на базе создания миниатюрных аналогов экосистем биосферы. Развитию этого важного направления в России и за рубежом способствует финансовая поддержка космической отрасли. Авторы справедливо подчёркивают важность таких работ не только для решения космических задач, но и для различных сфер народного хозяйства.

В России изучением этой проблемы заняты два академических института: Институт медико-биологических проблем (ИМБП) РАН и Институт биофизики (ИБФ) СО РАН. ИМБП РАН занят исследованиями медицинских аспектов жизнеобеспечения космонавтов в полёте, а ИБФ СО РАН сосредоточился на создании стационарных космических станций на других планетах (Луна, Марс), его сотрудники уже создали автономную экосистему БИОС-3 с замкнутым круговоротом веществ, которая обеспечивала жизнь экипажа

(2–3 человека) в течение 6 месяцев. Замкнутость системы по воде и газу достигла 100%, по пище – более 50%. Отрадно, что в состав искусственной экосистемы БИОС-3 включён почвоподобный субстрат, способный выполнять функцию почвы (педоценоза) по утилизации отмершей биомассы. Раньше это важное звено отсутствовало из-за опасения нарушений стерильности жилого отсека. Фототрофное звено представлено уже не хлореллой, а одним видом высших растений – звездчаткой средней, которая отличается рядом свойств, удобных для эксперимента. Исследователи добились рассинхронизации смены поколений растительности в разных участках камеры, благодаря чему удалось нивелировать циклы колебаний газового состава. Получилась реализация известной GAP-парадигмы\*, но не по видовому разнообразию, а по классам возраста.

В экспериментах ИБФ СО РАН изучались динамика соотношений  $O_2/CO_2$  в атмосферном воздухе и отклик экосистемы на температурные возмущения. Оказалось, что содержание  $O_2$  и  $CO_2$  колебались в противофазе, при большой разнице численных значений, что, по мнению авторов, указывает на влияние дыхательной активности почвоподобного субстрата и нуждается в дальнейшем специальном изучении.

Интересные данные получены в ходе экспериментов по оценке реакции экосистемы на изменение температурного режима. При повышении температуры воздуха от 18 до 30°C с шагом 3°C и экспозицией 1 ч концентрация  $CO_2$  в камере значительно снижалась. В этот период наблюдалось некоторое уменьшение интенсивности суммарного дыхания растений и биоты корнеобитаемого субстрата. Повышение температуры воздуха до 35°C привело к увеличению поглощения  $CO_2$ , хотя в репарационный период интенсивность по-

\* В геоботанике этим термином (от англ. gap – “окно”, “разрыв”) обозначается принцип мозаичного возобновления лесных сообществ. Естественные леса представляют собой сукцессионную мозаику разновозрастных элементов мозаично-ярусной структуры, размер разрывов (окон) в пологе леса определяет видовой состав успешно развивающихся древесных видов и их количественное отношение. Устойчивость лесного массива возможна лишь при условии закономерного сочетания элементов структуры, находящихся на разных стадиях развития.

глошения была ниже. Интенсивность дыхания в репарационный период оказалась почти на 30% выше, чем до стресса. Более длительное повышение температуры воздуха до 35°C привело к удвоению углекислотного компенсационного пункта с 1100 до 2500 ppm в течение 47 ч, и это значение почти не менялось в течение 300 ч.

Важным результатом эксперимента явилось то, что длительное повышение температуры воздуха и почвы привело к более быстрому старению растительного ценоза по сравнению с темпами старения до воздействия повышенной температурой воздуха и почвы. Дело в том, что оптимальный режим функционирования биоты соответствует диапазону температуры 18–25°C. Если температура ниже, экосистема функционирует в замедленном пессимальном режиме, а при температурах выше этого диапазона она переходит на ускоренный экстремальный режим, то есть функционирует на пределе своих физиологических возможностей, что и приводит к раннему старению.

Общий вывод авторов заключается в том, что созданная система позволяет проводить модельные экспериментальные оценки устойчивости экосистем к изменению параметров среды, включая моделирование антропогенных воздействий, и нуждается в дополнительной информации о критериях устойчивости экосистем, механизме реагирования экосистемы как на негативные, так и на позитивные стрессы. Совершенно очевидно, что функционирующая искусственная экосистема значительно сократит дорогостоящую и длительную процедуру экологического нормирования.

В реальной экосистеме баланс отношения  $O_2/CO_2$  регулируется согласованно в процессе метаболизма, когда почвенная биота подвергает отмершую биомассу (некромассу) минерализации. Продукты минерализации в форме газов, растворов и коллоидов используются фитоценозом в процессе фотосинтеза, осуществляемом новой биомассой. Газы поглощаются листьями, растворы – корнями, а коллоиды оседают в почвенной массе. Минеральные элементы, которые не были востребованы фитоценозом, взаимодействуют с органическими радикалами разлагающейся некромассы, образуя почвенный гумус – стратегический запас элементов минерального питания. Кислород, необходимый педоценозу для окисления отмершей биомассы, выделяет фитоценоз как побочный продукт процесса дыхания. Благодаря обмену фитоценоза и педоценоза отходами жизнедеятельности обеспечивается устойчивость состава воздушной среды. Обмен освобождает партнёров от энергетических затрат на поиск и добывание питательных ресурсов. В этой взаимовыгодной кооперации заключён главный смысл объединения разнообразной биоты в единую эко-

систему, который необходимо учитывать при создании искусственного аналога природной экосистемы.

Другая, более сложная задача, которую решают в ИБФ СО РАН состоит в создании биорегенеративной экосистемы с участием в ней человека. Самая большая сложность возникла при включении в общий круговорот вещества жидких и твёрдых отходов жизнедеятельности человека. Для этого авторы ввели в экосистему гетеротрофное звено, обеспечивающее дополнительное биологическое “сжигание” органических отходов с их последующим включением в общий массообмен системы. Авторы надеются, что в будущем почвоподобный субстрат сможет частично или полностью заменить нейтральный субстрат и обеспечить растения минеральными элементами, которые в искусственных системах предыдущих поколений поставлялись из запасов.

В природной экосистеме педоценоз представляет собой сложный биологический реактор, который полностью (а не частично) перерабатывает отмершую биомассу в минеральные элементы, необходимые фитоценозу для синтеза новой биомассы. Почвенная биота перерабатывает некромассу не последовательно, как в эксперименте, а параллельно: каждый тип биоты перерабатывает определённую фракцию биомассы с определённой скоростью, высвобождая питательные элементы, необходимые фитоценозу. Элементы, которые в данный момент не востребованы, образуют почвенный гумус. Абсолютные потери природной экосистемы не превышают 10% экомассы и компенсируются атмосферными (в том числе метеоритными) выпадениями и продуктами выветривания горных пород.

Создаётся впечатление, что исследователи создали уменьшенную копию экосистемы на основе изучения структуры природного оригинала и оставили без внимания её функцию, то есть попытались решать функциональную задачу структурными методами. Они справедливо указывают, что решение проблемы создания искусственных экосистем требует профессиональных знаний в самых разных областях естественно-научного и технического профиля. В некоторых странах тщательно разработаны отдельные блоки экосистем, однако они не задействованы в едином массообменном процессе. На наш взгляд, главной причиной этих неудач является отсутствие общей теории и описания механизма функционирования природной экосистемы. Трудно создать автономно функционирующую копию, если неизвестен механизм функционирования оригинала.

В Институте фундаментальных проблем биологии РАН ситуация обратная. Здесь есть лаборатория функциональной экологии, которая уже 20 лет изучает механизм функционирования природных экосистем, но у неё нет эксперименталь-

ной базы. Миниатюрный эксперимент “Эко-трон”, который доказал функционирование почвы синхронно с фитоценозом и возможность регулирования соотношения  $O_2/CO_2$  в реальном времени, был проведён в 1995–1997 гг. за счёт мизерных средств РФФИ. В лабораторных экспериментах было доказано, что состав гумуса зависит не от состава растительного опада, а от условий его разложения. Из одной массы растительного опада был получен гумус разных типов почв мира, в том числе красноцветных тропических. Однако наши попытки найти средства для организации экспериментальной базы функциональной экологии до сих пор не увенчались успехом, даже от РФФИ мы получаем только отказы. Поэтому представляется целесообразным создать лабораторию функциональной экологии в ИБФ СО РАН, который уже имеет хорошую экспериментальную базу, квалифицированный персонал и надёжное финансирование от космической от-

расли. Мы готовы оказать консультативную помощь нашим красноярским коллегам, поделиться накопленным опытом теоретических исследований в этой области. Наша позиция изложена в статье “Механизм функционирования почвы и устойчивость экосистем” (Вестник РАН. 2010. № 8), понимание функциональной экологии – в статье “Новое перспективное научное направление” (Вестник РАН. 2012. № 5). Более полно научные основы концепции рассмотрены в моей монографии “Функциональная экология” (М.: Наука, 2006).

*А.С. КЕРЖЕНЦЕВ,  
доктор биологических наук,  
Институт фундаментальных проблем  
биологии РАН  
kerzhent@rambler.ru*